

氏 名	岩 井 智 昭
生 年 月 日	
本 籍	石川県
学 位 の 種 類	博士 (工学)
学 位 記 番 号	博乙第221号
学位授与の日付	平成12年9月29日
学位授与の要件	論文博士 (学位規則第4条第2項)
学位授与の題目	ゴムのパターン摩耗過程とその摩擦・摩耗機構
論文審査委員(主査)	内山 吉隆 (工学部・教授)
論文審査委員(副査)	中本 義章 (工学部・教授) 松平 光男 (教育学部・教授)
	山田 敏郎 (工学部・教授) 山田 良穂 (工学部・教授)

## 学 位 論 文 要 旨

The purpose of this study is to investigate the friction and wear mechanism of the pattern abrasion of rubber. In the experiments isoprene rubber wheels were rubbed against mating glasses with the contact area being observed through the mating glass during sliding.

The influence of sliding speed on the friction and wear properties were examined. As the results, though two situations such as normal pattern abrasion and pattern abrasion with oily wear appeared, the wear rate was proportional to the 3rd power of the spacing of the abrasion patterns, respectively.

The relationship between the coefficient of friction and the contact area was examined using light interference establishing that the contact area decreased in accordance with ridge growth on the rubber surface. It was found that the coefficient of friction was proportional to the contact area between the rubber surface and the mating glass.

The strains generated on the rubber surface during sliding were measured to clarify the contribution of crack propagation to wear. The average tensile strain in the region between neighboring ridges was around 100% at maximum. Further, the maximum tensile strain on the rubber surface underneath the ridge at the point of crack propagation reached 750% at which point crack formed. These observed maximum strains were constant in the load range of this experiment.

Simultaneous observation of the ridge deformations and the coefficient of friction during sliding were conducted using a synchronizing signal from the rotating rubber wheel. It was found that the coefficient of friction increased when a ridge stuck to the mating surface and rapidly decreased as the ridge began to slip. This establishes that ridges moved in a quasi-stick-slip motion.

### 1. 緒言

ゴム材料は摩擦材として用いられることが多いので、摩擦係数が安定していて変動しないことや、耐摩耗性に優れていることが望まれる。ゴム材料を一方向に摩擦した時、しばしば摩擦方向と直角に周期的突起(リッジ)が形成され、パターン摩耗が生ずる。このとき、摩擦係数は減少し、摩耗が増加する。しかし、摩擦係数が低下する理由や、リッジの変形との関連はわかっていない。また、摩耗

はリッジ根元のき裂進展によるが、その伝播条件は明らかではない。このように、パターン摩耗では解明されていない点も多くあるため、その摩擦・摩耗機構を明らかにする必要がある。

そこで本研究では、摩擦中のゴム試料接触面の状態を直接観察し、摩擦係数とゴム表面性状を関連づけた。また、摩耗が進行する条件を明らかにすることを目的とした。

## 2. 実験装置および試料

摩擦・摩耗試験は回転する円板状ゴムとガラスを摩擦させ、摩擦係数とゴム試料の半径方向の摩耗寸法を測定した。このとき、相手面ガラスを通して、ゴム試料の接触面を摩擦中に観察できる。また、試験機の上方に光学顕微鏡を置き、接触面近傍の摩擦面の観測も行った。この装置を摩擦・摩耗試験機の基本的な構成とし、実験に応じて種々の機器を追加し、使用した。

ゴム試料は過酸化物加硫したイソブレンゴムを用い、その大きさは直径約60mm、厚さ12mmであった。ゴム試料は、実験前に液体窒素中で凍結させ、旋盤で旋削してから使用した。また、相手面にはBK7のガラス平面とガラス平凸レンズを用いた。

## 3. パターン摩耗に及ぼす摩擦速度の影響

ゴムの摩擦・摩耗特性は摩擦速度に影響される。そこで、パターン摩耗において、摩擦係数、寸法摩耗率、パターン間隔、および、き裂進展痕の間隔に及ぼす摩擦速度の影響を明らかにするため、摩擦速度を1mm/sから1000mm/sまで変えて摩擦・摩耗実験を行った。その結果、全ての速度範囲でゴム摩擦面にリッジが形成された。このとき、100mm/sより速い速度ではゴム摩擦面が油状物質で覆われていたため、潤滑されたような状態での摩擦であったと考えられる。Fig.1に寸法摩耗率と摩擦係数の変化を、Fig. 2にパターン間隔、き裂進展痕の間隔の変化を示す。

1mm/sから10mm/sの範囲では、摩擦速度が増加すると寸法摩耗率、摩擦係数、パターン間隔、き裂進展痕の間隔とも増加するが、10mm/sから100mm/sまではほぼ一定値を示した。摩擦速度が100mm/sを超えると、接触面に生成される油状物質のため、摩擦係数、寸法摩耗率、パターン間隔のいずれも急激に減少し、寸法摩耗率は約1000分の1になり、摩擦係数も約2/3に、パターン間隔は約1/3になった。このとき、き裂進展痕は観察できなかった。

また、Fig. 3に示すように、1mm/sから100mm/s以下の速度範囲と100mm/sを超える速度範囲において、摩耗形態は異なるが、寸法摩耗率はそれぞれパターン間隔の3乗に比例していた。

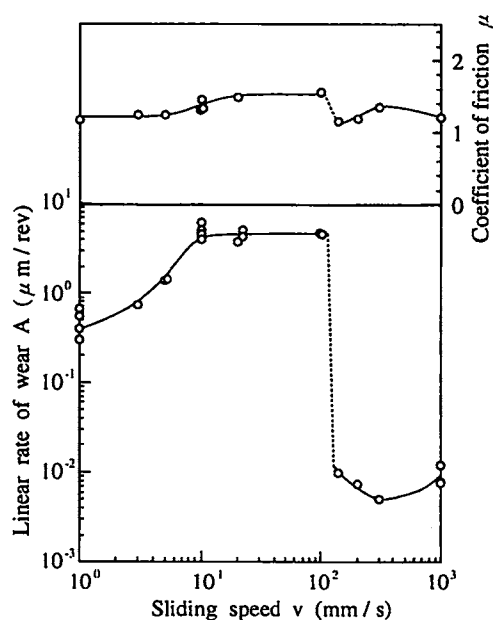


Fig.1 The linear rate of wear and the coefficient of friction as a function of sliding speed.

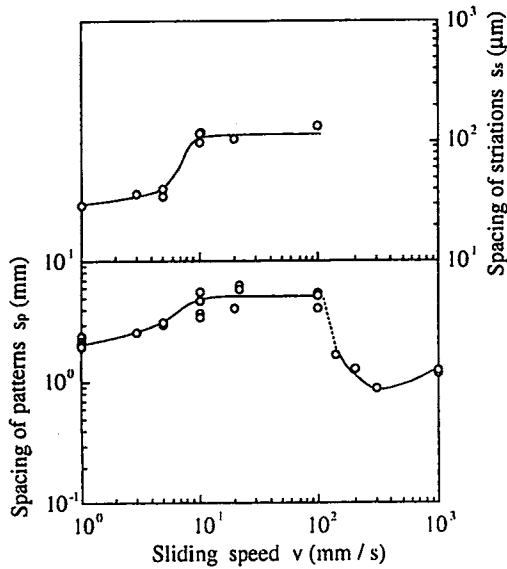


Fig.2 Spacing of patterns and spacing of striations plotted against sliding speed.

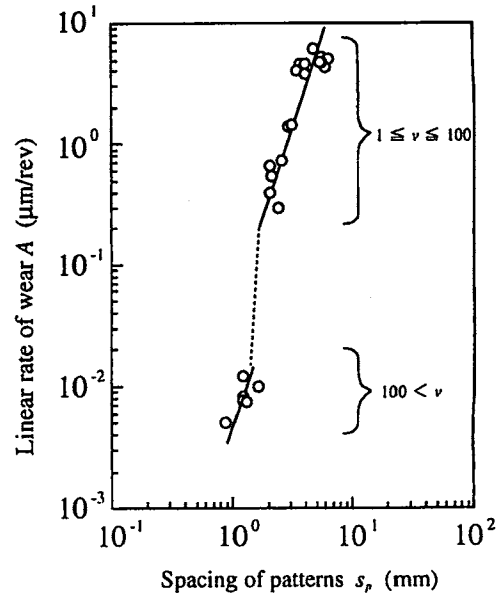


Fig.3 The relationships between the linear rate of wear and the spacing of patterns.

#### 4. パターン摩耗過程における接触面積と摩擦係数の関係

パターン摩耗過程において、摩擦係数が低下していく理由を明らかにするために、接触領域を光干渉法により観察し、パターンの形成過程におけるゴム試料と相手面ガラスの接触状態の変化を調べた。荷重9.8Nの結果をFig. 4に示す。リッジが形成される

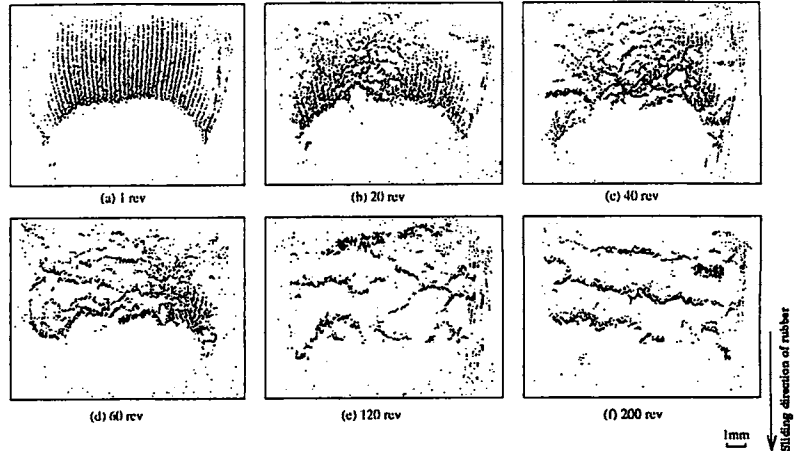


Fig. 4 Variations in the contact surface of the rubber specimen with number of revolutions at the applied load of 9.8N.

と、その間のゴム表面は相手面と接触しなかった。また、定常摩耗状態では、ゴム試料はリッジの部分だけで相手ガラス面と接触していた。このときFig.5に示すように、接触面積は摩擦回数の増加とともに減少していき、定常摩耗状態に達するとほぼ一定となった。また垂直荷重が高いほど接触面積は増大した。接触面内において、相手面と接触しているリッジの長さの総和を求めた。結果をFig.6に示す。リッジ長さの総和は摩擦回数の増加とともに減少していった。また、定常摩耗状態ではほぼ一定の長さになる傾向がある。単位長さ当たりのリッジにかかる摩擦力は、Fig.7に示すように、リッジの成長とともに

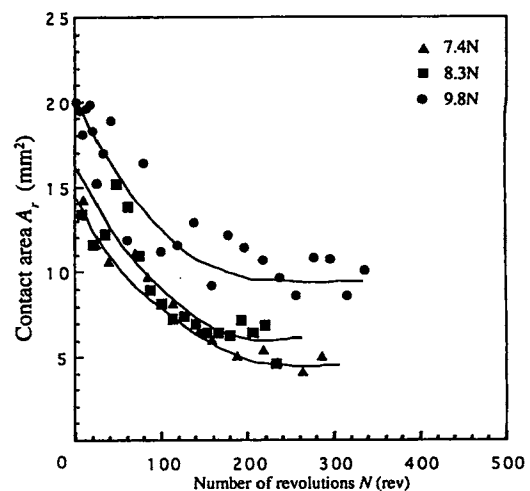


Fig. 5 Variations in the contact area with the number of revolutions of the rubber specimen.

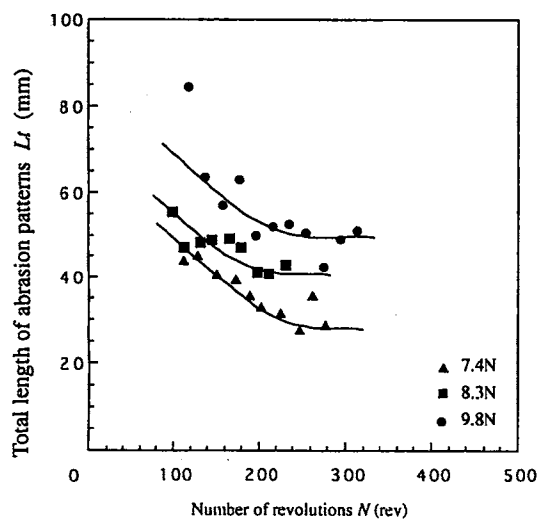


Fig. 6 Variations in the total length of abrasion patterns with the number of revolutions of the rubber specimen.

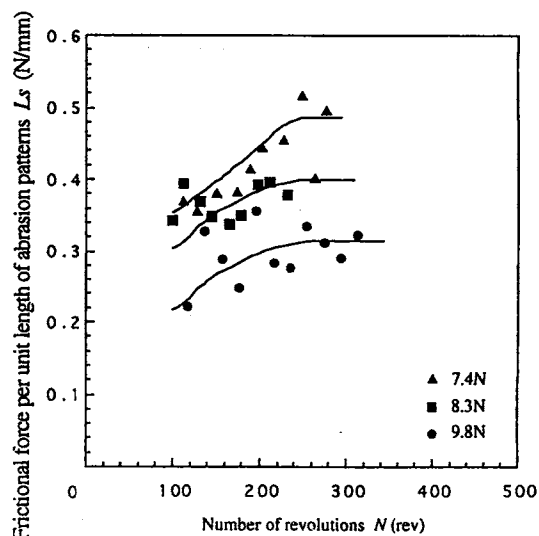


Fig. 7 Variations in frictional force per unit length of abrasion patterns with the number of revolutions of the rubber specimen.

大きくなり、定常状態ではほぼ一定となった。また、垂直荷重が大きいほど小さな値を示した。

## 5. パターン摩耗中の摩擦面に生ずるひずみ測定

摩擦中のゴム試料摩擦面に生ずるひずみとリッジ根元でのき裂進展との関係を明らかにするため、基準となるしるし（マーカー）をゴム試料表面に付着させ、それらの動きの経時的観察からひずみを求めた。このとき、摩擦面の平均的ひずみの測定では、個々のマーカーの位置を用いた。また、リッジ根元の微小な領域では、1つのマーカーが伸ばされて多数の断片に分割されるので、それぞれの断片を新たにマーカーとして用い、ひずみを測定した。その結果、摩擦中の接触面におけるゴム試料の変形の様子を計測することができた。パターン摩耗中の隣合うリッジ間の平均的な表面ひずみは、Fig. 8に示すように、圧縮ひずみは約20%程度であり、引張ひずみは約80%から100%の範囲であった。リッジ根元でき裂が進展するとき生ずるひずみは、Fig. 9に示すように約750%であった。また、き裂進展直後は開口

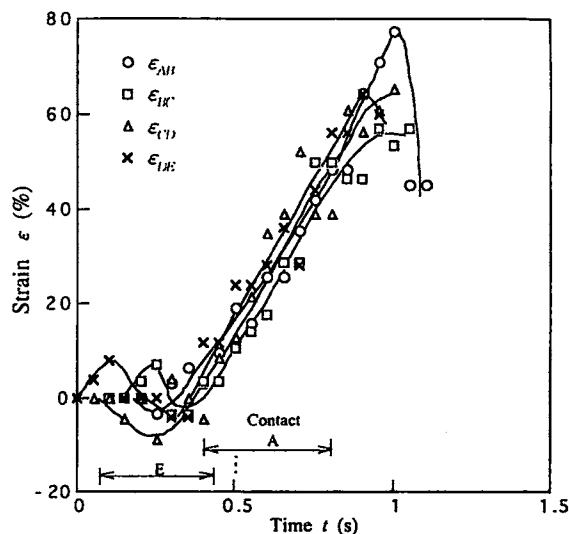


Fig. 8 Variations in the surface strains between two ridges with the sliding time.  $\epsilon_{AH}$ ,  $\epsilon_{BH}$ ,  $\epsilon_{CH}$  and  $\epsilon_{DH}$  are individual strains obtained from the relative positions of markers A, B, C, D and E ( $W=9.8N$ ,  $v=10mm/s$ ).

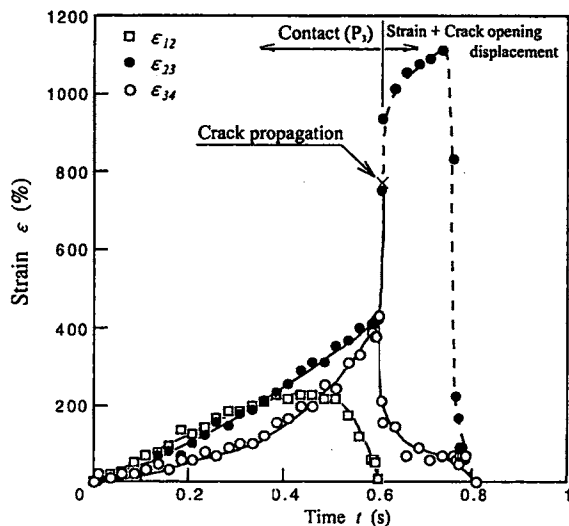


Fig. 9 Variations in the strains generated underneath the ridge with sliding time during crack propagation. This figure is plotted from the data of Fig. 5.6 ( $W=9.8N$ ,  $v=10mm/s$ ).

変位が加わり、見かけ上さらにひずみが増大した。摩擦前後のゴム表面の様子から (Fig.10)、き裂がマーカーの部分で生じたことが確認できる。荷重を変えて同様な実験を行なった結果、その荷重の範囲ではリッジ間の平均的なひずみ、き裂進展時のリッジ根元部のひずみともほぼ同じ値が得られた。

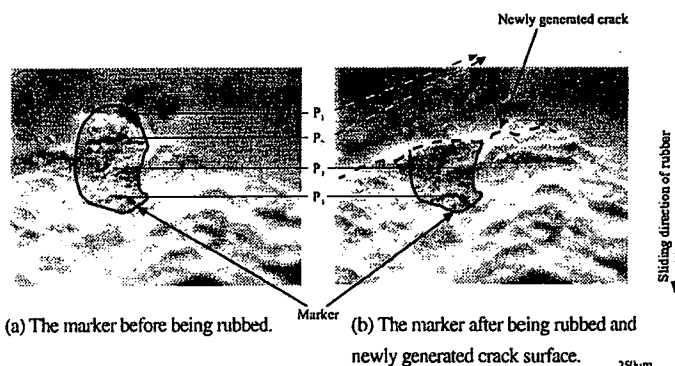


Fig. 10 Change of the marker underneath the ridge before and after being rubbed, and the new crack generated by friction ( $W=9.8\text{N}$ ,  $v=10\text{mm/s}$ ).

## 6. パターン摩耗過程における表面形状と摩擦係数の関係

ゴム摩擦面に形成された個々のリッジの変形と摩擦係数との関係を明らかにするために、ゴム試料の回転と同期する信号を用いて、摩擦面全面での摩擦係数の変化を調べた。その結果、全摩擦面にわたる摩擦係数の遷移図で、縞模様のように摩擦係数が変動する

様子を得た (Fig.11)。これらは、摩擦の初期状態から現れて定常摩耗状態まで存在しつづけ、また、摩耗の進行とともにそれぞれ平行に、ゴム試料摩擦方向と反対に移動した。これらの縞模様数は、Fig. 12に示すように、接近する複数のリッジを1つと考え、大きさが相対的に小さいリッジを数えないとして求めたリッジ数と一致した。摩擦係数の変化とゴム表面の動きを調べるため、多数のマーカーを付着させ、その位置変化を求めた。その結果、Fig13に示すように、摩擦係数が減少する所

では、その動きが急であった。そして、ゴム試料が1回転する間に摩擦係数が増加するのは、リッジの内側の面が相手面と接触し、リッジ根元部分が伸ばされるときであった。また、摩擦係数が大きく低下するのは、リッジの接触領域の大部分が一度に滑りを起こした時であり、連続して小さく低下するのは接触領域が一部分ずつ滑る時であった。このときの、リッジ間のゴム表面の移動速度を測定すると Fig.14のように、摩擦係数が増加する

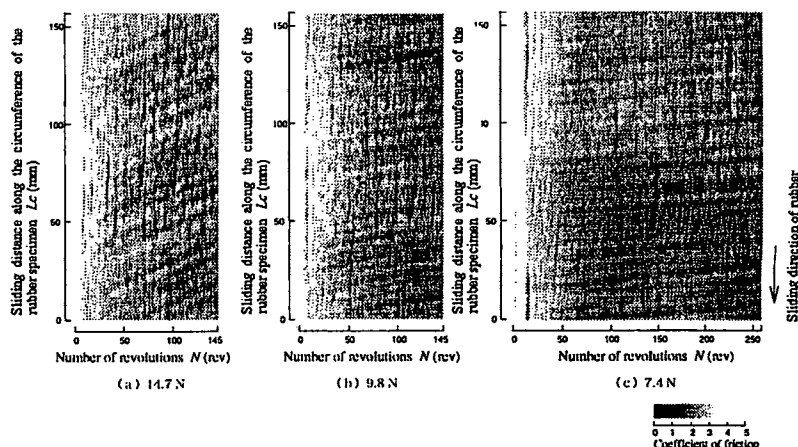


Fig. 11 Distribution maps of the coefficient of friction along the circumference of the rubber specimen. The density represents the value of the friction coefficient. Each vertical section shows the variation of the friction coefficient as the rubber specimen rotates through one revolution.

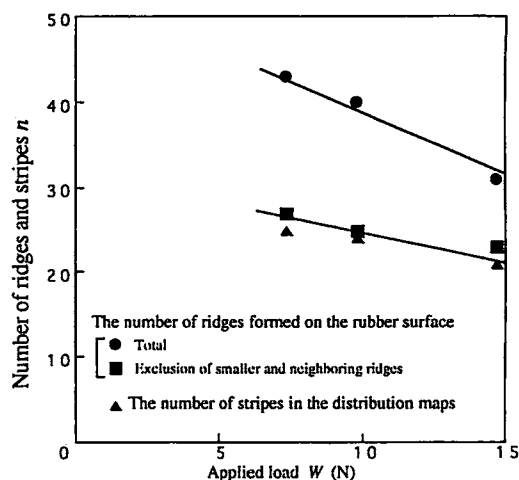


Fig. 12 The relationship between the number of ridges formed on the rubber surface and the number of stripes in the distribution maps of the friction coefficient shown in Fig. 11.

ときは、摩擦速度より低く、その値もほぼ一定であった。また、摩擦係数が低下する時には、移動速度はその瞬間に摩擦速度より速くなった。

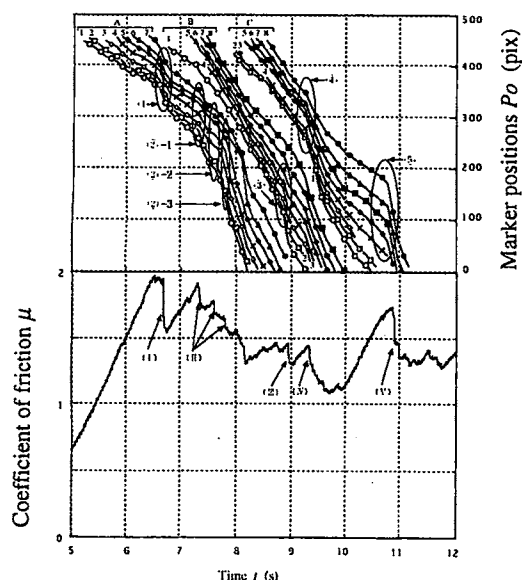


Fig. 13 The coefficient of friction compared with the variation of marker positions during sliding.

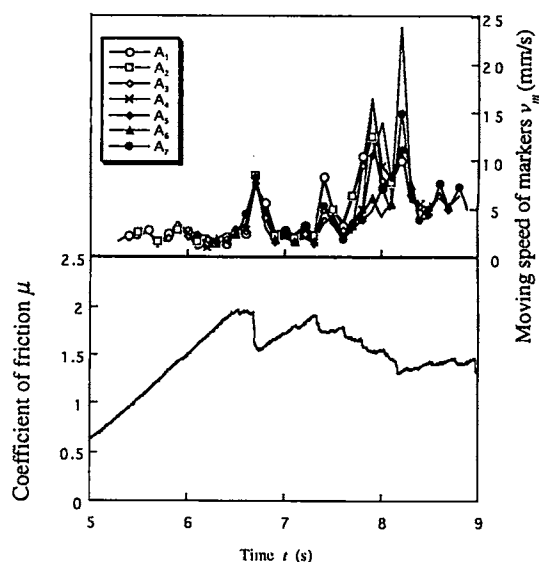


Fig. 14 The comparison between the coefficient of friction and the moving speed of the markers as calculated using the positions shown in Fig. 13.

## 7. パターン摩耗過程における摩擦・摩耗機構

摩擦中の接触面内でのゴム表面の動きから、リッジが相手面と接触する様子を詳細に検討した。その結果、リッジは相手面と接触すると、最初は摩擦力で後方に変形し丸められるが、ゴム試料が回転するにつれ、接触する部分の一部が相手面とスティックを生じ、リッジが伸ばされていく。この過程で、摩擦係数は一様に増加していく。さらにゴム試料が回転すると、スティック部分がすべり（スリップ）を起こし、摩擦係数が急激に減少する。一方、これらの一連の動きの間にも、接触するリッジに近接するゴム表面は止まることなく移動しつづけている。よって、パターン摩耗はあたかもスティックスリップに似ているが、一般的に言われている現象より、複雑な様相を示している。また、摩擦係数の変動は、ゴム表面にリッジが形成された結果生じたことがわかった。

摩耗が進行するのは、リッジ根元のゴム試料表面が相手面との摩擦により破断伸びまで伸ばされ、リッジ内側のゴムの相手面とのスティック領域と、相手面と接触しない領域の境界部分でき裂が進展するためである。また、リッジが選択的に荷重を支持するために、それらのリッジが移動することで他のリッジと連結していく。

## 8. 結言

パターン摩耗過程における摩擦・摩耗機構を明らかにするため、摩擦中の接触面のようすを観察し、ゴム表面の変形状態を調べた。その結果、パターン摩耗過程において、ゴム試料1周の平均的な摩擦係数が低下するのは、リッジの成長による相手面とゴム試料との接触面積の減少のためであること、ゴム試料1周のあいだの摩擦係数の増減は、リッジが転がりおよびスティックスリップ

のような接触状態を起こすことに対応していることを明らかにした。また、摩擦速度により摩擦の形態が異なっても、それぞれの摩耗形態で摩耗率はパターン間隔の3乗に比例することがわかった。さらに、リッジ根元のき裂進展による摩耗の進行は、その材料の破断伸びに関連することを示した。

## 学位論文審査結果の要旨

平成12年8月1日に第1回学位論文審査会を開催し、提出された学位論文および関連資料について詳細に検討し、併せて専門および外国語に関する学力試験を行った。平成12年8月7日の口頭発表後、第2回審査委員会を開催し、慎重に協議した結果、以下の通り判定した。

本研究は、ゴムの摩耗形態として代表的な「パターン摩耗」について研究したものである。パターン摩耗が生じるとき、ゴム表面にはアブレーションパターンが観察されるが、本研究では、ゴム円板とガラスレンズまたはガラス平板とを摩擦させ、ガラスを通してゴム表面の変形、き裂の進展を直接観察できる装置を用い、摩擦・摩耗と摩擦速度の関係、パターン摩耗過程における接触面積と摩擦係数との関係、および、摩耗が進行するときのゴム表面の変形とき裂の進展などを調べ、興味ある結果を得ている。平滑なゴム表面が繰返し摩擦を受けると小さなパターンが形成され、定常摩耗状態で一定間隔になり、摩擦係数が低下する現象を接触面積の減少と関係づけて説明している。また、摩擦中のゴム表面観察から、パターンを形成する舌状突起(リッジ)の根元で大変形が起き、き裂が進展する瞬間を確認している。また、そのときのリッジにかかる摩擦係数の大きさと、そのゴム摩擦軌道上の位置の変化とを摩擦係数の遷移図として表わしている。

以上のように本研究は、通常みられるパターン摩耗条件下でのゴムの摩擦・摩耗機構に関する研究をより発展させるとともに、実用タイヤ、ベルト、シール、ロールなどのゴム製品の摩擦・摩耗を制御するための重要な指針を与えている。

従って、本研究は博士(工学)の学位に値するものと判定する。